干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

蒙古国中部草原地区风蚀沙漠化的风沙活动特征
——以乔伊尔市为例

崔珂军[1,2,3,4,5]， 李生宇[1,2,3,4,5]， 范敬龙[1,2,4,5]， 王海峰[1,2,3,5]， 孟晓于[1,2,3,4,5]，
苗佳敏[1,2,3,4,5]， 吕振涛[1,2,3,4,5]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所，国家荒漠－绿洲生态建设工程技术研究中心，新疆 乌鲁木齐 830011； 2. 中国科学院新疆生态与地理研究所，荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011； 3. 中国科学院新疆生态与地理研究所，莫索湾沙漠研究站，新疆 石河子 832000； 4. 中国科学院新疆生态与地理研究所，塔克拉玛干沙漠研究站，新疆 库尔勒 841000； 5. 中国科学院大学，北京 100049）

摘 要：蒙古国是中蒙俄经济走廊的重要区段，但面临严重的荒漠化问题，区域经济社会发展受到严重威胁，而蒙古国中部草原地区是主要的荒漠化新扩展区，正经历强烈的草原风蚀沙漠化过程。以戈壁苏木贝尔省首府乔伊尔市为研究区，利用自建自动气象观测站（2019年5月—2020年7月）、集沙仪观测站（2019年8月—2020年8月）及当地气象站（1990—2018年）数据，对当地风蚀沙漠化的风动力条件、风沙流输沙及其他影响因素等基本特征进行了研究。结果表明：（1）乔伊尔市具有强劲的风动力条件，年输沙势可达735.96 VU，合成输沙势为428.76 VU，合成输沙方向为SSW（195.06°），风向变率指数为0.58，属高风能环境、中等变率双峰风况。（2）临界起沙风速因受土壤水分和植被盖度的共同影响而随季节变化，夏季最高，冬季最低，春季与秋季居中，且相差较小。（3）地表具有强烈的风沙活动，年风沙流输沙通量可达2.135 $t \cdot m^{-1} \cdot a^{-1}$，Owen最大输沙量模型适于该区风沙流模拟。研究结果对于蒙古国中部草原区防沙治沙和生态恢复具有重要参考价值。

关 键 词：风蚀沙漠化；风况；起沙风速；输沙势；输沙量
文章编号：

荒漠化是当今全球最为严重的生态环境问题之一。与中国北部接壤的蒙古国是中蒙俄经济走廊上的重要国家，也是中国重要的全面战略合作伙伴。但自1990年以来，蒙古国生态退化严重，荒漠化快速发展，已成为全球四大沙尘暴源区之一。风蚀沙漠化是蒙古国荒漠化的主要形式[1-2]，严重影响植被景观和居民生活环境质量，近年来风蚀沙漠化土地的重心不断向北扩展[3]。乔伊尔市为戈壁苏木贝尔省首府，地处蒙古国中部草原地区，受内陆干旱气候及强烈人为活动影响，风蚀沙漠化情况十分严重，为蒙古国典型的风蚀沙漠化新扩展区。

风动力条件是风蚀沙漠化的关键驱动因素[4-8]，了解近地层风况特征，系统评估风能环境，掌握风沙活动规律，是研究风蚀沙漠化形成与演化过程的关键内容，也是制定区域风沙灾害防治体系的重要依据[9-12]。国内外学者对世界各地的风况及输沙情况进行了大量的研究，阐明了风蚀沙漠化与风动力的关系，揭示了风沙地貌的风成条件和变化规律[13-16]，为防沙治沙提供了科学依据[17-21]，科学指导了实际工程建设[22-24]。董玉祥[25]对西藏风蚀沙漠化进行了研究，认为风是区域风蚀沙漠化重要驱动因素。罗凤敏等[26]对乌兰布和东北缘起沙风风况及输沙势特征进行了详细研究，为风蚀沙漠化防治提供了数据支持。张正偲等[27]对腾格里沙漠西部

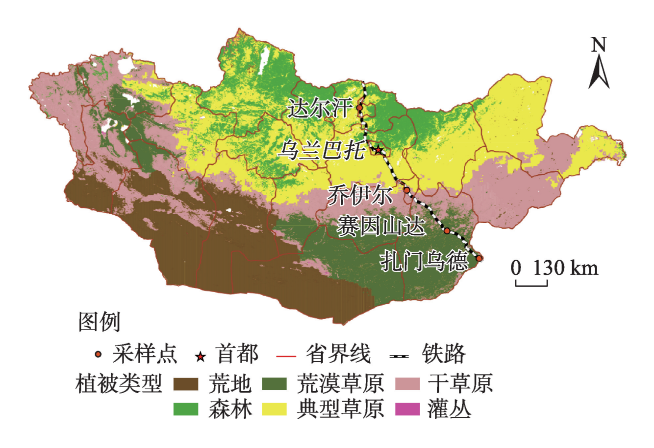
收稿日期：2021-09-03； **修订日期：**2021-11-04
基金项目：国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项（2017YFE0109200）；中国科学院A类战略性科技先导专项子课题（XDA2003020201）；中国科学院关键技术人才项目资助
作者简介：崔珂军（1995-）男，硕士研究生，主要从事环境工程与生态修复研究. E-mail: 464509354@qq.com
通讯作者：李生宇（1975-）男，博士，正高级工程师，主要从事风沙地貌与风沙工程研究. E-mail: lishy_hb@163.com

和西南部风能及风沙地貌进行研究，为区域风沙活动强度评价和风沙地貌演化提供了依据。Louassa等[28]对阿尔及利亚西部平原的风况进行了研究，并提出了风蚀防治建议。

蒙古国中部草原地区风蚀沙漠化研究至今鲜有报道[29]。本文对地处蒙古国中部草原地区乔伊尔市的风动力条件、风沙流输沙及相关影响因素进行了分析，旨在掌握蒙古国中部草原地区风蚀沙漠化过程的基本特征，为当地风沙灾害防治与生态恢复提供参考。

1 研究区概况

蒙古国是一个内陆国家，降水自北向南逐渐递减，年均风速自东南向西北逐渐递减[29]。乔伊尔市是蒙古国戈壁苏木贝尔省的首府[30]，位于108°24′E，46°21′N，地形较为平坦，植被景观为草原，植被盖度20%~30%[31]，大多为草本植物，少量为灌木，草本以针茅、冷蒿、小画眉草为主，灌木以锦鸡儿属为主。与蒙古其他大部分地区相比，该区草地退化严重[32]。从自然区划上来看，乔伊尔市地处典型草原、干草原、荒漠草原混交带(图1)，植被对自然和人为(放牧)扰动极为敏感[33-37]。乔伊尔市为温带大陆性气候，年平均降水200~300 mm，年均气温1.8 ℃，年最高气温22.9 ℃，最低气温-23.7 ℃；3—5月为大风期，年均风速呈现波动变化(图2)。该区风速较大，10 m高度平均风速为5.07 m·s^{-1}，瞬时风速最高可达19.73 m·s^{-1}(2019年5月—2020年7月)。2001—2012年，乔伊尔市2 m高度起沙风平均风速(6.83 m·s^{-1})大于其南部扎门乌德地区(6.46 m·s^{-1})和其北部达尔汗地区(6.24 m·s^{-1})。该区沙尘暴多发，2010—2019年年均沙尘暴日数为14.6 d，83%发生在春季。



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2020)4395号的标准地图制作，底图边界无修改。

图1 蒙古国研究区地理位置及植被类型分布

Fig. 1 Geographical location and distribution of vegetation types in the study area of Mongolia

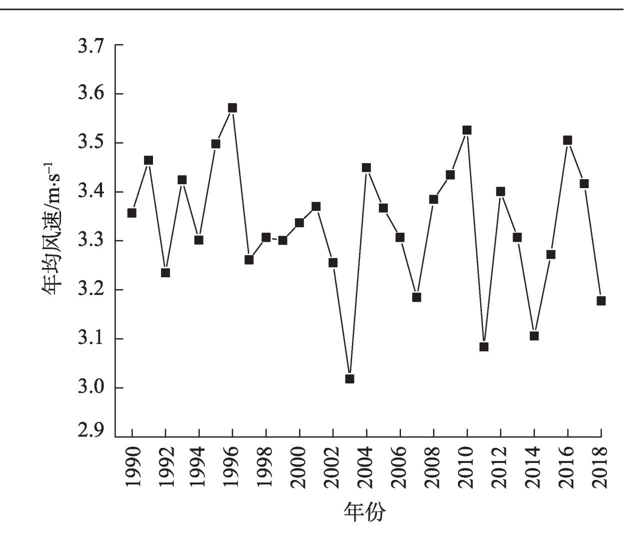


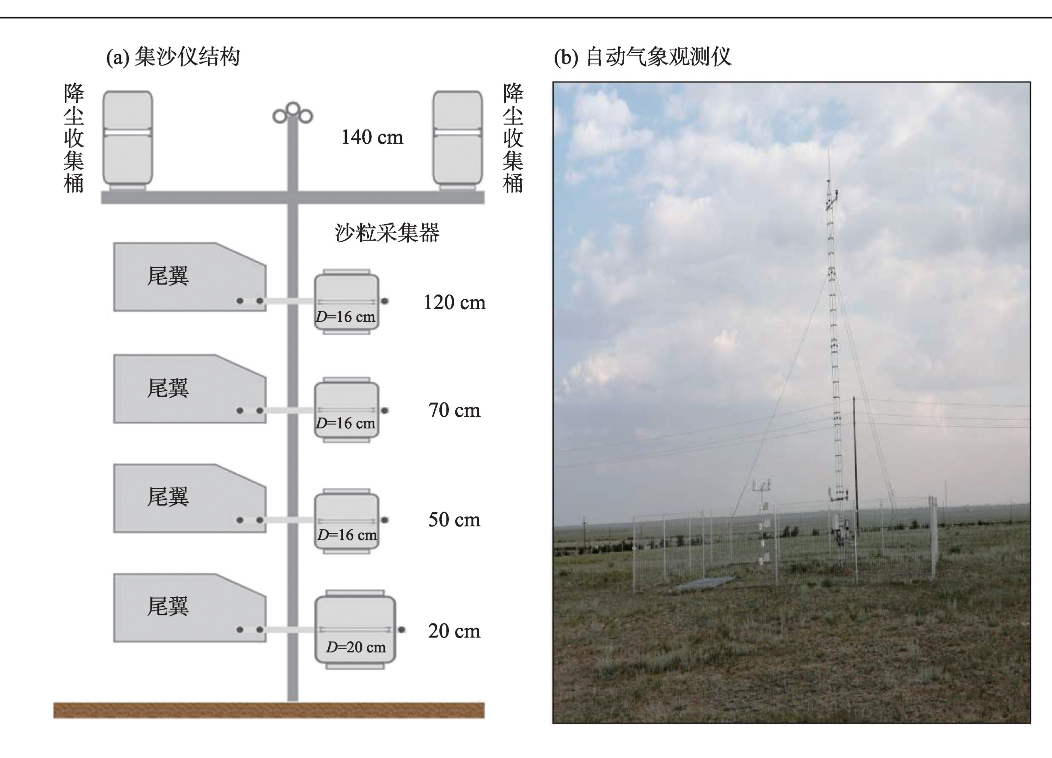
图2 1990—2018年乔伊尔市平均风速

Fig. 2 Average wind speed in Choir City from 1990 to 2018

2 数据与方法

2.1 数据来源

风动力数据(2019年5月—2020年7月)来源于中国科学院新疆生态与地理研究所在乔伊尔市建立的梯度气象观测站(108°21′E，46°24′N)(图3)。气象站观测高度分别为0.2 m、8.0 m、10.0 m，所安装仪器包括：自动超声风速仪(型号：WindSonic，英国Gill制造)、空气温度湿度集成观测仪(型号：HMP155A-L，芬兰Vaisala公司制造，测量范围达到-80~60 ℃)、土壤温度观测仪、土壤含水量观测仪(型号：CS650，可精确测量土壤水分、温度、电导率，探针长300.0 mm，直径3.2 mm，间距32.0 mm)，每小时观测一次数据。输沙数据(2019年8月4日—2020年8月15日)来源于中国科学院新疆生态与地理研究所在乔伊尔市气象观测站架设的自制梯度大容量集沙仪(图3)观测数据。集沙仪沙粒采集器高度距地面分别为20 cm、50 cm、70 cm、120 cm，沙粒采集器进沙口为边长2 cm的正方形，集沙盒直径分别为20 cm、16 cm、16 cm、16 cm的圆筒。其他风速、沙尘暴数据来源于乔伊尔市气象站。



注:D为沙粒采集器直径。

图3　集沙仪结构及自动气象观测仪

Fig. 3　Sand collector structure and automatic meteorological observation instrument

2.2　研究方法

2.2.1　地表粗糙度　地表粗糙度是指在边界层大气中,近地层风速向下递减到零的高度[38],表征了地表与大气的相互作用,反映了地表特征对大气湍流的阻抗作用,为现代流体力学和大气科学的重要概念,是大气边界层理论和风沙科学重要参数,被广泛应用。地表粗糙度的计算方法有很多,本文选取0.8 m、2.0 m、10.0 m中性层结数据370组,采用常用的风速比法[38]计算,公式如下:

$$Z_0 = e^{\frac{u_1 \ln Z_2 - u_2 \ln Z_1}{u_1 - u_2}} \tag{1}$$

式中:Z_0为地表粗糙度(m);u_1为Z_1处的风速(m·s^{-1});u_2为Z_2处的风速(m·s^{-1});Z_1、Z_2为观测高度(m)。

2.2.2　摩阻风速　在物理学中,摩阻速度u_*被用来反映微粒所受空气动力的大小。已有的风蚀起沙观测和实验结果指出,当u_*超过某一阈值(临界摩阻速度)时,粒子便会脱离地面而进入空中。摩阻风速采用公式(2)[39]计算。

$$u_* = \frac{u_2 - u_1}{5.75(\log_{10} Z_2 - \log_{10} Z_1)} \tag{2}$$

式中:u_*为摩阻速度(m·s^{-1});u_1为Z_1处的风速(m·s^{-1});u_2为Z_2处的风速(m·s^{-1});Z_1、Z_2为观测高度(m)。

2.2.3　临界摩阻速度　临界摩阻速度是指能引起地表起沙的摩阻速度的临界值[40],采用公式(3)[41]计算。计算结果表明,乔伊尔市的临界摩阻速度为0.5045 m·s^{-1}。

$$u_{*t} = A\sqrt{\frac{\sigma - \rho}{\rho} gd} \tag{3}$$

式中:u_{*t}为临界摩阻速度(m·s^{-1});A为经验系数(0.11);σ为沙粒的密度(2650 kg·m^{-3});ρ为空气密度(1.256 kg·m^{-3});g为1980年大地测量学家推导出来的重力加速度(9.780327 m·s^{-2});d为当地沙粒粒径(乔伊尔当地以砂粒为主)(表1),本文采用0.05~2 mm中位数1.02 mm计算,土壤类型以裂化碱土为主(表2)。

2.2.4　临界起沙风速　大气边界层的气流在运动过程中,使地面的沙物质受到风力作用,并在风力增大到一定阈值时,地表沙粒由静止状态而进入运动,这个阈值风速被定义为临界起沙风速[38]。临界起沙风速是风沙物理学的重要指标。临界起沙风速采用公式(4)[40]计算。

$$u_t = 5.75 u_{*t} \log_{10} \frac{z}{Z_0} \tag{4}$$

式中:u_t为临界起沙风速(m·s^{-1});u_{*t}为临界摩阻速

表1 乔伊尔市土壤颗粒粒度占比

Tab. 1 Percentage of soil particle size in Choir City /%

样本编号	砂粒（2~0.05 mm）	粉粒（0.05~0.002 mm）	黏粒（<0.002 mm）
1	80.4	10.3	9.3
2	78.4	12.0	9.6
3	77.5	14.6	7.9
4	79.0	9.5	11.5
5	81.2	7.3	11.5

注：土壤颗粒划分采用美国粒级划分；采样点均位于观测点附近。

表2 乔伊尔市土壤类别占比

Tab. 2 Percentage of soil types in Choir City

土壤种类	占比/%
戈壁棕壤	0.35
裂化碱土	91.09
碱和盐渍土壤	8.56

度（$m\cdot s^{-1}$）；z 为计算高度（m）；Z_0 为地表粗糙度（m）。

2.2.5 输沙势 输沙势（Drift potential，DP）表示一个地区在一定时间内的潜在最大输沙量，计算公式[20]如下：

$$Q = u^2(u - u_t)t \tag{5}$$

式中：Q 为输沙势（VU）；u 为10 m高度处的起沙风速（大于临界起沙风速的风速值）（$m\cdot s^{-1}$）；u_t 为临界起沙风速（$m\cdot s^{-1}$）；t 为起沙风时间（一般为观测时段内所观测的起沙风时间数与总观测时间数的百分比）。

根据矢量合成法则将16个方位的输沙势进行合成，可以得到合成输沙势（Resultant drift potential，RDP）和合成输沙方向（Resultant drift direction，RDD）。RDP表示一个地区的净输沙能力，RDD则反映沙粒搬运的总体方向。RDP/DP称为风向变率指数，用来反映一个地区的风向组合特征。当风向变率指数<0.3时，为高变率，说明风况复杂；当风向变率指数为0.3~0.8时，为中变率，一般对应钝双峰或者锐双峰的风况；当风向变率指数>0.8时，为低变率，说明风况单一。

3 结果与分析

3.1 起沙风

风蚀沙漠化很大程度受当地风况影响，而起沙风是风况的代表性指标之一。在2019年5月—2020年7月期间，乔伊尔市10 m高度起沙风平均风速为9.49 $m\cdot s^{-1}$，其中5月最大（11.53 $m\cdot s^{-1}$），4月其次（10.35 $m\cdot s^{-1}$），1月最小（7.38 $m\cdot s^{-1}$）。起沙风平均风速季节变化较大，春季（3—5月，10.47 $m\cdot s^{-1}$）最大，而夏季（6—8月，8.66 $m\cdot s^{-1}$）、秋季（9—11月，8.75 $m\cdot s^{-1}$）、冬季（12—2月，8.33 $m\cdot s^{-1}$）较小，且相差不大。该区各方向起沙风的发生频率也不同，NNW（18.70%）和N（15.40%）频率最高（图4），其他风向较低，尤其ESE（1.36%）和SE（1.91%）最低（图4a），该区整体盛行偏北风。

3.2 输沙势与输沙方向

输沙势和输沙方向能够较客观反映一个地区的风沙活动强度和沙物质整体搬运方向。合成输沙势越高的地区通常风向较单一或风沙活动强度较大，而合成输沙势越低的地区为多风向或风沙活动强度较小[14]。根据输沙势的大小，以前学者[20]将风能环境分为4类，分别是低风能（<200 VU）、中风能（200~400 VU）和高风能（>400 VU）环境。乔伊尔市全年输沙势为735.96 VU（图5），属高风能环境地区。乔伊尔市的一个周期年（2019年6月—2020年5月）的年合成输沙势为428.76 VU，属于高风能环境；年合成输沙方向为195.06°（SSW），风沙整体向西南偏南方向输移；风向变率指数为0.58，属于中变率双锋风况。

全年各风向输沙势差异较大，NNW风向输沙势为149.84 VU，占总输沙势的20.40%，N风向输沙势为135.32 VU，占总输沙势的18.40%，这2个方向的输沙势占据主导地位；SW风向输沙势为3.12 VU，SSW风向输沙势为3.01 VU，分别仅占总输沙势的0.42%和0.40%。

各季节的风向变率指数也不同，春季、夏季的变率指数分别为0.62、0.58，属于中变率，对应双峰风况；秋季与冬季的变率指数是0.84，属于低变率，表明该区秋季和冬季的风况单一，全年整体以西北风为主。

从全年输沙势玫瑰图（图5）可以看出，乔伊尔市各季节输沙势差异显著，合成输沙方向在SE—SW之间变化。春季输沙势最大，达到483.89 VU，占全年输沙势的65.70%，合成输沙方向为204.83°（SSW）；夏季输沙势为159.23 VU，占全年输沙势的21.60%，合成输沙方向为190.11°（S）；秋季输沙势为73.00 VU，占全年输沙势的10.00%，合成输沙方向为143.68°（SE）；冬季输沙势最小，为19.84 VU，占

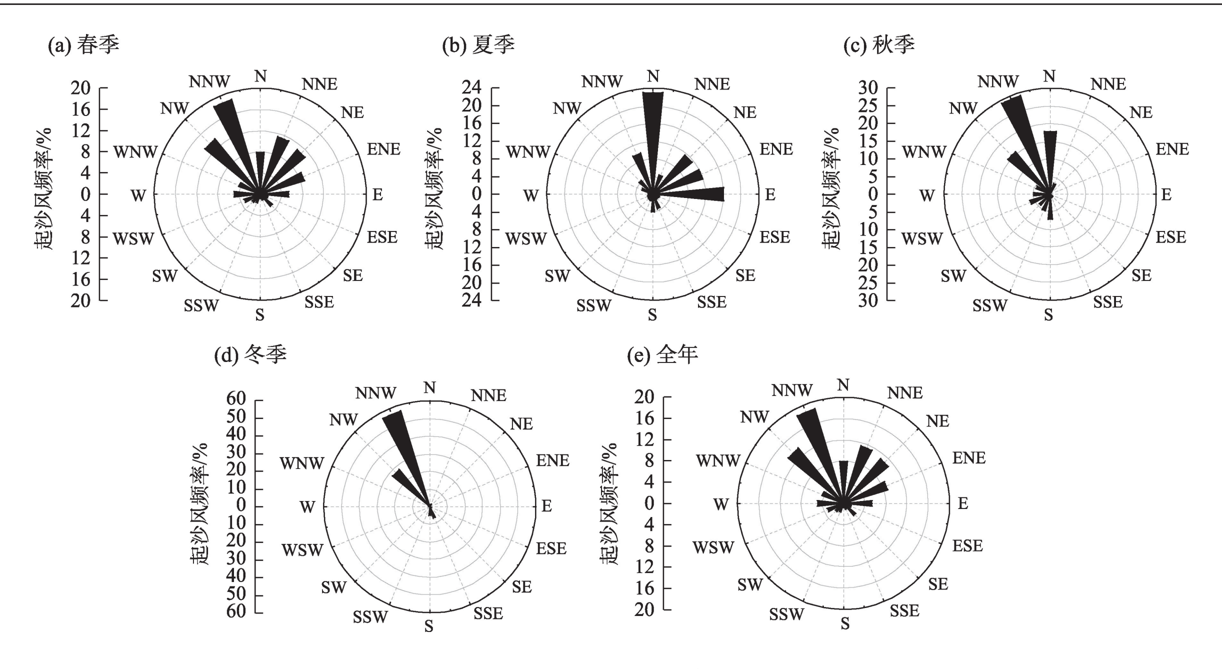
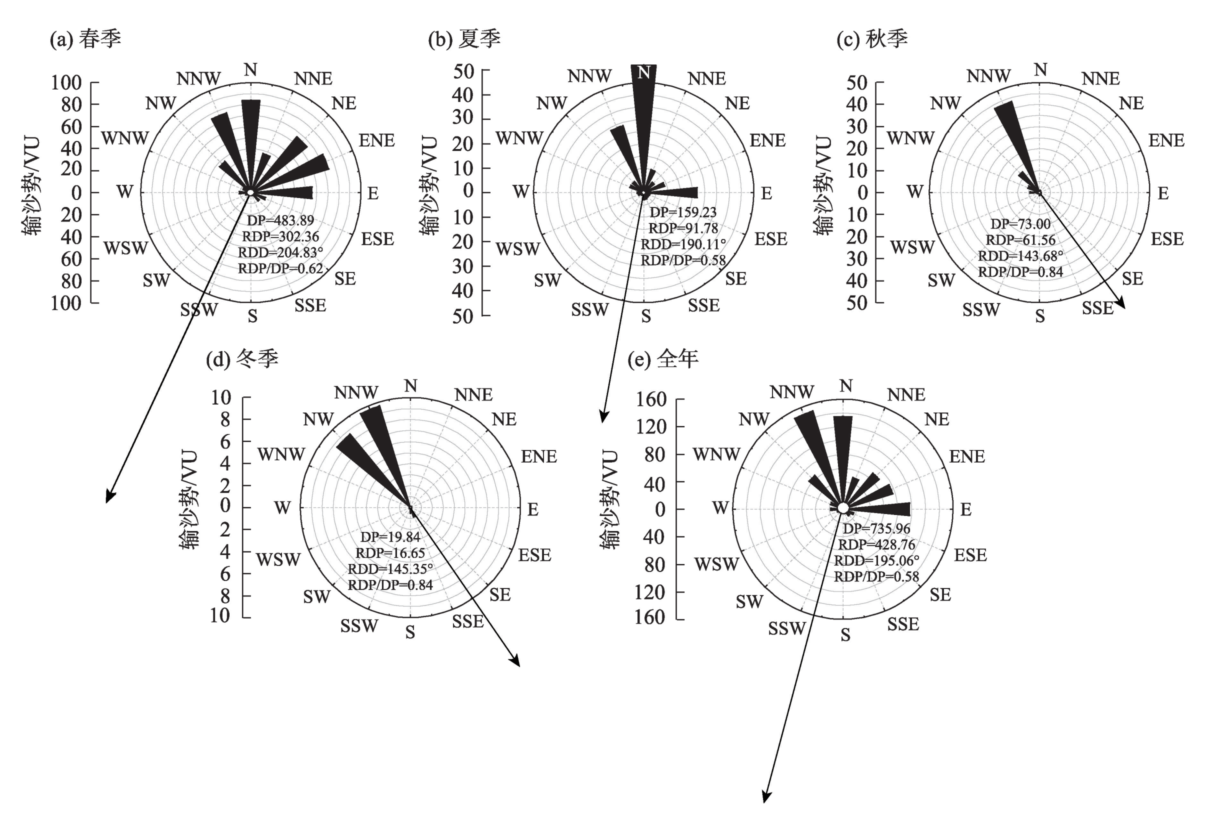


图4 乔伊尔市起沙风频率玫瑰图

Fig. 4 Rose map of sandy wind frequency in Choir City



注:DP为输沙势,表示潜在最大输沙能力;RDP为合成输沙势,表示一个地区的净输沙能力;RDD为合成输沙方向,反映沙粒搬运的总体方向;RDP/DP为风向变率指数,反映一个地区风向组合特征。

图5 乔伊尔市输沙势玫瑰图

Fig. 5 Rose map of sand drift potential in Choir City

全年输沙势的2.70%,合成输沙方向为145.35°(SE)。可见,乔伊尔市主要输沙能量集中在春季和夏季,春、夏两季的输沙方向与秋、冬两季有一定差异,但春、夏、秋、冬四季的输沙方向都偏南(图5),

表明该区常年受到北向来流的影响。

3.3 风沙流输沙

输沙量是防沙工程设计的重要参数。以前学者观测发现，在一定的风力条件下，风沙流中跃移粒子与风场相互作用，具有一种负反馈机制，并将输沙量限定在某个定值，因而在沙源充足地区，风对沙粒的搬运能力有一定限度[42]。学者们开发了很多输沙量估算模型(表3)[43-44]，其计算结果差别很大，适用区域不同，应用前必须对其估算精度进行实际验证。学者们研究发现[45]，风沙流结构在垂直高度上的分布普遍符合指数函数。本文基于乔伊尔市风沙流实际观测数据，发现指数函数对风沙流垂直分布的拟合效果较好(图6)。通过积分法，求得一个周期年(2019年6月—2020年5月)的输沙总量为2.135 t·m^{-1}·a^{-1}，用该值除以起沙时间(2645 h)，得到实际输沙量为2.24×10^{-4} kg·m^{-1}·s^{-1}。实际输沙量与模型计算值对比发现，Bagnold、Kawamura、Zingg、Sorensen的模型对乔伊尔市的计算结果均偏大，而Hsu模型偏小，Owen模型更接近实际值。

表3 乔伊尔市输沙量估算

Tab. 3 Estimation of sand transport volume in Choir City

模型名称	模型方程	输沙量/kg·m^{-1}·s^{-1}
Bagnold	$Q=c_1\sqrt{\frac{d}{D}}\frac{\rho}{g}u_*^3$	3.84×10^{-2}
Kawamura	$Q=c_2\frac{\rho}{g}(u_*-u_{*t})(u_*+u_{*t})^2$	7.26×10^{-2}
Zingg	$Q=c_3(\frac{d}{D})^{0.75}\frac{\rho}{g}u_*^3$	2.44×10^{-2}
Owen	$Q=c_4\frac{\rho u_*^4}{g}[1-(\frac{u_{*t}}{u_*})^2]$	2.77×10^{-3}
Sorensen	$Q=c_5\rho u_{*t}(u_*-u_{*t})(u_*+7.6u_{*t}+205)$	5.72×10^{-3}
Hsu	$Q=c_6 e^{4.79d-0.47}\frac{u_*^3}{(gd)^{1.5}}$	2.10×10^{-5}

注：相关系数 c_1、c_2、c_3、c_4、c_5、c_6 分别取值1.80、2.78、0.83、0.25、0.0004、0.0001；Q 为输沙量(kg·m^{-1}·s^{-1})；D 为标准粒径(0.25 mm)；d 为当地沙粒粒径(1.02 mm)；ρ 为空气密度(1.256 kg·m^{-3})；g 为重力加速度(9.780327 m·s^{-2})；u_* 为摩阻速度(m·s^{-1})；u_{*t} 为临界摩阻速度(0.5045 m·s^{-1})。

3.4 临界起沙风速变化及影响因素

临界起沙风速是风蚀沙漠化的关键参数，与土壤水分、植被盖度、空气密度、土壤粒度、土壤质地、土壤含盐量以及重力加速度都有关系[46-47]。本文根据10 m、2 m、0.8 m高度的风速数据，计算出该区的年均临界起沙风速(10 m高度为6.77 m·s^{-1}、2 m高度为4.77 m·s^{-1}、0.8 m高度为3.63 m·s^{-1})。该区10 m

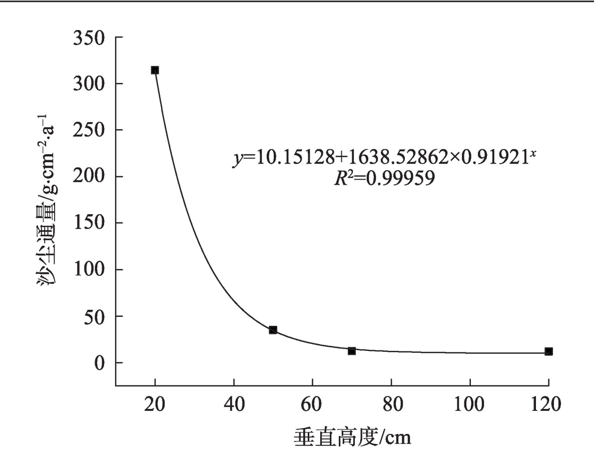


图6 乔伊尔市沙尘通量函数拟合

Fig. 6 Fitting of dust flux function of Choir City

高度临界起沙风速呈明显的季节变化，夏季最大(7.25 m·s^{-1})，秋、春季次之(6.64 m·s^{-1}、6.61 m·s^{-1})，冬季最小(6.57 m·s^{-1})。

2019年6月—2020年5月土壤水分、归一化植被指数(NDVI)与临界起沙风速(2 m高度)随时间同步变化，三者趋势吻合性很好(图7)。临界起沙风速2019年7月最大，2020年1月最小，同期植被覆盖度和土壤水分表现出相同的变化趋势。

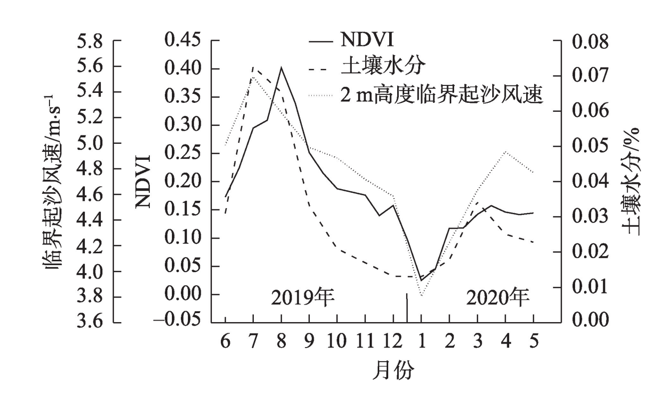


图7 乔伊尔市临界起沙风速、土壤水分和归一化植被指数(NDVI)变化趋势

Fig. 7 Variation trends of dust emission threshold wind speed, soil moisture and NDVI in Choir City

土壤水分一定程度上可以反应降水情况。2020年春季乔伊尔市出现气温升高而土壤水分减少的现象，此现象(气温升高、降水减少)导致春旱。对乔伊尔市近15 a(2001—2015年)的气温和降水分析发现，其中有10 a发生类似现象，可见2020年的春旱并不是特殊现象，该区春旱多发。

降水会影响土壤水分，并引起植被盖度变化进而影响临界起沙风速。乔伊尔市多年降水量和ND-

VI都为夏季最高,因而夏季临界起沙风速最大。从图7看出,乔伊尔市2020年春季土壤水分减少,说明降水减少,加之风速较大(图4)和植被盖度低,春旱严重,使春季输沙强烈。因此,春季是乔伊尔市风蚀沙漠化的主要发生时期。

4 讨论

2019年6月—2020年5月乔伊尔市起沙风发生频率为17.30%,大风(≥10.80 m·s^{-1})日数为68 d,加之地处温带大陆性气候区,降水少(年均200~300 mm),多晴天,气候干燥,地形较为平坦,没有高大山脉阻挡,气流能够长驱直入,地表风动力强劲,因此全年输沙势(735.96 VU)较大,属于高风能环境,远大于塔克拉玛干沙漠(全年最大输沙势399.00 VU)、库姆塔格沙漠(全年最大输沙势285.67 VU)、腾格里沙漠(全年最大输沙势358.70 VU)[15],而与巴丹吉林沙漠最大输沙势(733.40 VU)相差不大[16]。该区地处蒙古高原腹地,受到北冰洋和太平洋气流的影响,春、夏季主要受北向和东向来风影响,秋、冬季主要是受西北来向风影响。

乔伊尔市输沙强烈除了与风动力强劲有关外,还与当地下垫面条件有关。下垫面条件主要受当地植被类型及畜牧业影响。该区植被多为草本植物,伴生有零星低矮灌木,受年内降水季节变化的影响,春季的植被条件极差,削弱大风能量少且固沙能力差,加之此时是当地的主要风季时段,风力强,临界起沙风速小,因此春季风蚀沙漠化过程活跃,风沙活动强烈。在放牧过程中,牲畜的采食、践踏都会对植被以及土壤造成不同程度的破环,土壤表层结构疏松化,抗风蚀能力大幅降低,极易风蚀起沙,形成风沙流。近年来随着该区牧群数量快速增长,草场过牧问题极为严重,因而风蚀问题凸显,地表风沙流输沙通量很大。

2010—2019年乔伊尔市的沙尘暴年日数总体呈现波动增加趋势,与近年来风速的变化趋势呈现正相关,说明该区风蚀沙漠化过程在逐渐增强。未来,随着中蒙俄经济走廊的建设,蒙古国高强度经济建设活动将快速增加。作为中蒙俄经济走廊的关键节点,乔伊尔市交通便利,矿产资源丰富,将是重要经济建设区,风蚀沙漠化问题可能会更加严重,成为区域经济社会可持续发展的重要威胁,亟待对该区风蚀沙漠化过程进行深入研究,并因地制宜研发适宜当地自然环境条件的沙漠化防治措施。

5 结论

地处蒙古国中部地区的乔伊尔市,风蚀沙漠化过程极为活跃,已经成为蒙古国荒漠化向北拓展区,亟待探索适宜当地环境条件的风沙灾害防治及生态修复技术方案。对实地观测数据与气象数据综合分析得出以下结论:

(1)该区风动力强劲,起沙风平均风速为9.49 m·s^{-1},最大风速为19.73 m·s^{-1};起沙风以NNW与N为主,两者共占34.10%。

(2)输沙势为735.96 VU,合成输沙势为428.76 VU,属于高风能环境;风向变率指数为0.58,属于中比率双锋风况,合成输沙方向为195.06°(SSW方向)。

(3)该区下垫面的植被条件受到自然降水和人为放牧的强烈影响,在强劲风力作用下,表层土壤风蚀强烈,年风沙流输沙通量可达2.135 t·m^{-1}·a^{-1}。

(4)年内风动力波动很大,春季为风季且干旱,是风蚀发生的主要时段。

参考文献(References)

[1] Jin L, Chen F, Carrie M, et al. Causes of early Holocene desertification in arid Central Asia[J]. Climate Dynamics, 2012, 38(7-8): 1577-1591.

[2] Liu Y H, Dong G R, LI S, et al. Status, causes and combating suggestions of sandy desertification in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Chinese Geographical Science, 2005, 15(4): 289-296.

[3] 孟晓于. 蒙古国土地沙漠化时空变化特征及其驱动力[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021. [Meng Xiaoyu. Temporal and spatial variation characteristics and driving forces of land desertification in Mongolia[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021.]

[4] Dong Z, Hu G, Yan C, et al. Aeolian desertification and its causes in the Zoige Plateau of China's Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Environmental Earth Science, 2010, 59(8): 1731-1740.

[5] 张丽颖. 中国北方沙漠化成因分析以及防治对策研究[J]. 四川水泥, 2016(11): 349. [Zhang Liying. Cause analysis and control countermeasures of desertification in northern China[J]. Sichuan Cement, 2016(11): 349.]

[6] 曾小箕, 丁建丽, 樊亚辉. 新疆艾比湖地区土地沙漠化时空演变及其成因[J]. 水土保持通报, 2014, 34(2): 287-292. [Zeng Xiaoji, Ding Jianli, Fan Yahui. Spatial and temporal changes of desertification land and related influencing factions in Ebinur Lake of Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. Bulletin of Soil and Water

Conservation, 2014, 34(2): 287−292.]
[7] 宁良锋. 石羊河流域沙漠化成因分析[J]. 甘肃科技, 2012, 28(17): 47−48, 75. [Ning Liangfeng. Cause analysis of desertification in Shiyang River Basin[J]. Gansu Science and Technology, 2012, 28(17): 47−48, 75.]
[8] 孟鑫, 李立华, 孟祥彬. 荒漠化、沙漠化及沙尘暴的危害及治理[J]. 林业科技, 2004, 29(2): 22−23. [Meng Xin, Li Lihua, Meng Xiangbin. Hazards and control of desertification, desertification and sandstorm[J]. Forestry Science and Technology, 2004, 29(2): 22−23.]
[9] 张正偲, 董治宝. 风沙地貌形态动力学研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(6): 734−747. [Zhang Zhengcai, Dong Zhibao. Research progress on aeolian geomorphology and morphodynamics[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(6): 734−747.]
[10] 张正偲, 董治宝, 赵爱国. 输沙势计算中的"时距"问题[J]. 干旱区地理, 2010, 33(2): 177−182. [Zhang Zhengcai, Dong Zhibao, Zhao Aiguo. Effect of different time intervals in assessing sand drift potential[J]. Arid Land Geography, 2010, 33(2): 177−182.]
[11] 张宁宁, 刘彪, 王晓默. 探讨地表粗糙度的一种计算方法[J]. 中国人口资源与环境, 2013, 23(增刊2): 326−328. [Zhang Ningning, Liu Biao, Wang Xiaomo. Calculational method for discussing land surface roughness[J]. China Population, Resources and Environment, 2013, 23(Suppl. 2): 326−328.]
[12] Yizhaq H, Xu Z W, Ashkenazy Y. The effect of wind speed averaging time on the calculation of sand drift potential: New scaling laws[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2020, 544: 1−10.
[13] 李继彦, 董治宝, 李恩菊, 等. 察尔汗盐湖雅丹地貌区风况分析[J]. 中国沙漠, 2013, 33(5): 1293−1298. [Li Jiyan, Dong Zhibao, Li Enju, et al. Wind regime of Yardang landform regions in the Qarhan Salt Lake[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(5): 1293−1298.]
[14] 田敏, 钱广强, 杨转玲, 等. 柴达木盆地东北部哈勒腾河流域风况特征及其对风沙地貌发育的影响[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1): 1−9. [Tian Min, Qian Guangqiang, Yang Zhuanling, et al. Characteristics of wind regime and its influences on the development of aeolian landforms in the Haertenghe Reach, northeastern Qaidam Basin, China[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(1): 1−9.]
[15] 王永胜, 杨文斌, 李永华, 等. 库姆塔格沙漠东缘荒漠绿洲过渡带风况及输沙势[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(1): 140−144. [Wang Yongsheng, Yang Wenbin, Li Yonghua, et al. Wind regime and resultant sand-transporting potential in the desert-oasise-cotone in the eastern marginal zone of the Kumtag Desert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(1): 140−144.]
[16] Elena A F, Christopher H H, Thomas E, et al. Wind regime, sediment transport, and landscape dynamics at a Mars analogue site in the Andes Mountains of northwestern Argentina[J]. Icarus, 2020, 346: 1−20.
[17] 李晋昌, 韩柳彦, 赵艳芳, 等. 晋北沙漠化地区起沙风风况与输沙势[J]. 中国沙漠, 2016, 36(4): 911−917. [Li Jinchang, Han Liuyan, Zhao Yanfang, et al. Sand-driving wind regime and drift potential in the sandy desertification area of northern Shanxi, China[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(4): 911−917.]
[18] 张华, 李锋瑞, 李玉霖, 等. 科尔沁沙地奈曼旗近5年来风况及合成输沙势[J]. 中国沙漠, 2004, 24(5): 107−111. [Zhang Hua, Li Fengrui, Li Yulin, et al. Wind regime and resultant sand-transporting potential of Naiman Banner in Horqin Sandy Land during past five years[J]. Journal of Desert Research, 2004, 24(5): 107−111.]
[19] 庞营军, 吴波, 贾晓红, 等. 毛乌素沙地风况及输沙势特征[J]. 中国沙漠, 2019, 39(1): 62−67. [Pang Yingjun, Wu Bo, Jia Xiaohong, et al. Characteristics of wind regime and drift potential in Mu Us Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(1): 62−67.]
[20] 杨兴华, 何清, 艾力·买买提明. 塔克拉玛干沙漠塔中地区春夏季风蚀起沙研究[J]. 中国沙漠, 2010, 30(4): 770−776. [Yang Xinghua, He Qing, Mamtimin Ali. Dust emissions by wind erosion in spring and summer at Tazhong of Taklimakan Desert[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(4): 770−776.]
[21] 胡光印, 董治宝, 张正偲, 等. 若尔盖盆地起沙风风况与输沙势特征[J]. 中国沙漠, 2020, 40(5): 1−5. [Hu Guangyin, Dong Zhibao, Zhang Zhengcai, et al. The regime of sand driving wind and sand drift potential in Zoige Basin[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(5): 1−5.]
[22] 谢胜波, 喻文波, 屈建军, 等. 青藏高原红梁河风沙动力环境特征[J]. 中国沙漠, 2018, 38(2): 219−224. [Xie Shengbo, Yu Wenbo, Qu Jianjun, et al. Dynamic environment of blown sand at Honglianghe River of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(2): 219−224.]
[23] 汪海娇, 田丽慧, 张登山, 等. 青海湖东岸沙地风沙活动特征[J]. 中国沙漠, 2020, 40(1): 49−56. [Wang Haijiao, Tian Lihui, Zhang Dengshan, et al. Characteristics of blown sand activities in sandy land on the eastern shore of the Qinghai Lake of China[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(1): 49−56.]
[24] Pilão R, Pinto P, Guedes R. Representative period of measurements for wind regime characterization in Dobrogea region, Romania[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2014, 125: 94−101.
[25] 董玉祥. 西藏沙漠化灾害现状及其驱动力研究[J]. 自然灾害学报, 2001, 10(2): 96−102. [Dong Yuxiang. Research on the status desertification disaster and its driving force in Xizang[J]. Journal of Natural Disasters, 2001, 10(2): 96−102.]
[26] 罗凤敏, 高君亮, 辛智鸣, 等. 乌兰布和沙漠东北缘起沙风风况及输沙特征[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 145−152. [Luo Fengmin, Gao Junliang, Xin Zhiming, et al. Characteristics of sand-driving wind regime and sediment transport in northeast edge of Ulan Buh Desert[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(4): 145−152.]
[27] 张正偲, 董治宝, 钱广强, 等. 腾格里沙漠西部和西南部风能环境与风沙地貌[J]. 中国沙漠, 2012, 32(6): 1528−1533. [Zhang

Zhengcai, Dong Zhibao, Qian Guangqiang, et al. Wind energy environments and aeolian geomorphology in the western and southwestern Tengger Desert[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32 (6): 1528-1533.]

[28] Louassa S, Merzouk M, Merzouk N K. Sand drift potential in western Algerian Hautes Plaines[J]. Aeolian Research, 2018, 34: 27-34.

[29] Meng X, Gao X, Li S, et al. Spatial and temporal characteristics of vegetation NDVI changes and the driving forces in Mongolia during 1982—2015[J]. Remote Sensing, 2020, 12(4): 1-25.

[30] 葛孚刚, 王华林, 王志才, 等. 蒙古国乔伊尔市断裂活动特征[J]. 工程建设与设计, 2017(19): 24-26. [Ge Fugang, Wang Hualin, Wang Zhicai, et al. Activity characteristics of Joel fault in Mongolia[J]. Construction & Design for Engineering, 2017(19): 24-26.]

[31] 孟翔冲. 蒙古国沙质荒漠化对中国北方沙质荒漠化影响研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012. [Meng Xiangchong. Study on the impact of sandy desertification in Mongolia on sandy desertification in northern China[D]. Changchun: Jilin University, 2012.]

[32] 张艳珍, 王钊齐, 杨悦, 等. 蒙古高原草地退化程度时空分布定量研究[J]. 草业科学, 2018, 35(2): 233-243. [Zhang Yanzhen, Wang Zhaoqi, Yang Yue, et al. Research on the quantitative evaluation of grassland degradation and spatial and temporal distribution on the Mongolia Plateau[J]. Pratacultural Science, 2018, 35 (2): 233-243.]

[33] 贺晶, 吴新宏, 杨婷婷, 等. 基于临界起沙风速的草地防风固沙功能研究[J]. 中国草地学报, 2013, 35(5): 103-107. [He Jing, Wu Xinhong, Yang Tingting, et al. Research on sand-fixing function of grassland based on threshold wind velocity[J]. Chinese Journal of Grassland, 2013, 35(5): 103-107.]

[34] 申彦波, 沈志宝, 杜明远, 等. 风蚀起沙的影响因子及其变化特征[J]. 高原气象, 2005, 24(4): 611-616. [Shen Yanbo, Shen Zhibao, Du Mingyuan, et al. Factors affecting on dust emission by wind erosion and their variational characteristics[J]. Plateau Meteorology, 2005, 24(4): 611-616.]

[35] Zhang K, Qu J, An Z. Characteristics of wind-blown sand and near-surface wind regime in the Tengger Desert, China[J]. Aeolian Research, 2012, 6: 83-88.

[36] Erdenebayar M, Masato S, John A G, et al. Relationships between soil moisture and dust emissions in a bare sandy soil of Mongolia [J]. Particuology, 2016, 28: 131-137.

[37] 秦豪君, 韩永翔. 近56 a蒙古高原草原地上净初级生产力变化[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 914-922. [Qin Haojun, Han Yongxiang. Change of above ground net primary productivity of grassland over the Mongolian Plateau in recent 56 years[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(4): 914-922.]

[38] 何清, 胡文峰, 杨兴华, 等. 内蒙古拐子湖地区风沙运动若干参数计算[J]. 干旱区地理, 2012, 35(2): 187-192. [He Qing, Hu Wenfeng, Yang Xinghua, et al. Several caculations of parameters of wind-sand movement at Guaizi Lake area of Inner Mongolia[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(2): 187-192.]

[39] 程宏, 邹学勇, 张春来. 摩阻风速与平均风速的转化关系研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(2): 133-134, 138. [Cheng Hong, Zou Xueyong, Zhang Chunlai. A study on the relationship between friction wind velocity and mean wind velocity[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(2): 133-134, 138.]

[40] 申彦波, 沈志宝, 杜明远, 等. 风蚀起沙的影响因子及其变化特征[J]. 高原气象, 2005, 24(4): 611-616. [Shen Yanbo, Shen Zhibao, Du Mingyuan, et al. Factors affecting on dust emission by wind erosion and their variational characteristics[J]. Plateau Meteorology, 2005, 24(4): 611-616.]

[41] 吴正. 风沙地貌学[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 27. [Wu Zheng. Aeolian geomorphology[M]. Beijing: Science Press, 1987: 27.]

[42] 丁国栋. 风沙物理学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2010: 79. [Ding Guodong. Wind sand physics[M]. Beijing: China Forestry Press, 2010: 79.]

[43] 郭树江, 杨自辉, 王多泽, 等. 石羊河流域下游青土湖近地层风尘分布特征[J]. 干旱区地理, 2016, 39(6): 1255-1262. [Guo Shujiang, Yang Zihui, Wang Duoze, et al. Dust distribution characteristics of Qingtu Lake surface layer at downstream Shiyang River [J]. Arid Land Geography, 2016, 39(6): 1255-1262.]

[44] 刘箴言, 常春平, 郭中领, 等. 3类集沙仪野外测试对比[J]. 中国沙漠, 2020, 40(6): 33-42. [Liu Zhenyan, Chang Chunping, Guo Zhongling, et al. A comparative study on field test of sand collectors[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(6): 33-42.]

[45] 黄雨晖, 韩小元, 赵健, 等. 新疆戈壁地区风沙流结构及其粒径特征研究[J]. 气象与减灾研究, 2019, 42(3): 199-205. [Huang Yuhui, Han Xiaoyuan, Zhao Jian, et al. Study on wind-blown sand flow structure and particle size characteristics in Gobi area of Xinjiang[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2019, 42 (3): 199-205.]

[46] Shao Y, Lu H. A simple expression for wind erosion threshold friction velocity[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(D17): 22437-22443.

[47] 朱好, 张宏升. 沙尘天气过程临界起沙因子的研究进展[J]. 地球科学进展, 2011, 26(1): 30-38. [Zhu Hao, Zhang Hongsheng. Review of the threshold for dust emission during dust events[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(1): 30-38.]

Aeolian sand activity characteristics of wind erosion and desertification in the grassland area of central Mongolia: A case of Choir City

CUI Kejun[1,2,3,4,5], LI Shengyu[1,2,3,4,5], FAN Jinglong[1,2,4,5], WANG Haifeng[1,2,3,5],
MENG Xiaoyu[1,2,3,4,5], MIAO Jiamin[1,2,3,4,5], LYU Zhentao[1,2,3,4,5]

(1. National Engineering Technology Research Center for Desert-Oasis Ecological Construction, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 3. Mosuowan Desert Research Station, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 4. Taklimakan Desert Research Station, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Korla 841000, Xinjiang, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Desertification is known to be the "cancer of the earth". Mongolia is a country with the most serious desertification in the world. The desertified land in Mongolia is still expanding, and the central region is an important new expansion area. The frequent dust storms have caused serious harm and are a great threat to infrastructure connectivity, energy and resource base construction, ecological security, and environmental health and have become a major hurdle limiting Mongolia's socio-economic development and ecological security. Choir City, the capital of Gobi Sumber Province, is located in the central part of Mongolia. It is an important section of the Mongolian Plateau of the China-Mongolia-Russia economic corridor. It belongs to the mixed zone of grassland, dry grassland, and desert grassland. It is sensitive to natural and human disturbance and has serious wind erosion desertification. In this study, the wind dynamic conditions for the occurrence of local wind erosion desertification were examined using observations from the self-built automatic meteorological observatory (May 2019—July 2020) and the meteorological station of Choir City (1990—2018) and the sand collector (August 2019—August 2020). The results showed that (1) there were strong wind dynamic conditions for the occurrence of wind erosion desertification in the region. The annual sand drift potential was 735.96 VU, the resultant sand drift potential was 428.76 VU, and the resultant drift direction was SSW (195.06°). The wind direction variability index was 0.58, which belonged to the high wind energy environment with a moderate rate of variation-blunted double-peak wind conditions. (2) The critical wind speed was affected by soil moisture and vegetation coverage, which varied with seasons: it was the highest in summer and the lowest in winter, and spring and autumn are in the middle. (3) Because of the strong wind dynamic conditions and degraded surface, the sediment transport flux of aeolian sand flow was very high ($2.135\ t \cdot m^{-1} \cdot a^{-1}$) in Choir City. The maximum sediment transport rate model developed by Owen was suitable for the simulation of aeolian sand flow in this area. This study presented a detailed analysis of wind dynamic conditions in Choir City, located in the central desert steppe region of Mongolia. The characteristics of critical starting winds in Choir City were analyzed in each season by combining soil moisture and particle size, vegetation conditions, and other factors to identify the wind dynamic basis and related influencing factors in the central steppe region of Mongolia and provide basic data for local wind and sand disaster control. The research results could provide an important reference for desertification control, ecological restoration, and local engineering construction in the desert steppe area of central Mongolia.

Key words: wind erosion desertification; wind condition; sand-driving wind; sand drift potential; sand transport volume